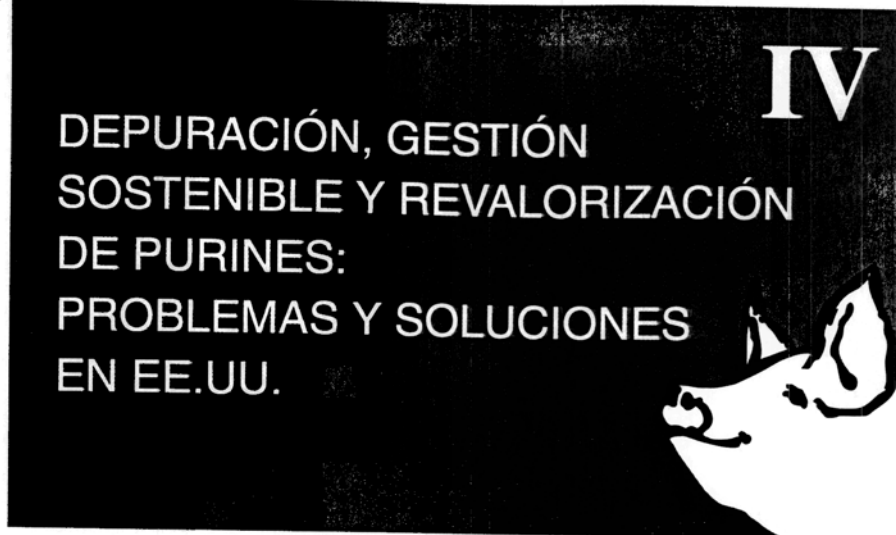


*Treatment & Sustainable Management
of Manure & By-Products: Problems &
Solutions in USA*



M. B. Vanotti y P. G. Hunt

Departamento de Agricultura de Estados Unidos, ARS, Centro de Investigación Coastal Plains; 2611 W. Lucas St; Florence, SC 29501, EEUU; vanotti@florence.ars.usda.gov
"Depuración, Gestión Sostenible y Revalorización de purines: problemas y soluciones en EEUU"

Con los avances de las nuevas tecnologías de depuración pueden obtenerse grandes beneficios, sea en la cría intensiva de ganado, en la preservación de la calidad del medioambiente. Ello requiere una fusión de conocimientos y técnicas de innovación. Existen muchos obstáculos, unos evidentes y otros sutiles, que deben superarse cada vez que se introduce una nueva manera de hacer las cosas.

En 1999 la industria ganadera en EE.UU. generó unos ingresos de 99.000 millones de USD. Anualmente se generan más de 1.100 millones de Tm de estiércoles y purines, la mitad de ellos se producen en granjas intensivas. En este trabajo se exponen los avances en las nuevas tecnologías de depuración, que están haciendo posible una gestión sostenible de las propias explotaciones y del medioambiente, aportando nutrientes y mejorando las propiedades de los suelos. Con ello se eliminan los riesgos de contaminación en suelos, aguas y aire y se mejora el bienestar y la salud humana.

INTRODUCCIÓN

EN 1999, y de acuerdo a las estimaciones de la Oficina Tributaria del Gobierno (GAO), la industria ganadera de Estados Unidos generó unos ingresos de 99.000 millones de USD. La utilización de los nutrientes de los estiércoles, de forma sos-

tenible para el medio ambiente, es una de las cuestiones esenciales a nivel de gestión con que se enfrenta la industria ganadera de Estados Unidos. Anualmente se generan más de 1.100 millones de toneladas de estiércol de origen animal que contienen 12.900 millones de libras de nitrógeno (5.850 millones de kg) y 3.800 millones de libras de

fósforo (1.725 millones de kg). Aproximadamente la mitad de estas cifras producen animales que viven en lugares estabulados. El estiércol animal, cuando se gestiona debidamente, puede utilizarse como fuente de nutrientes para las cosechas y para la mejora de las propiedades del suelo mediante el aporte de materia orgánica al suelo. Por otro lado, la gestión inadecuada de estiércol y de subproductos puede suponer una amenaza para el suelo, para la calidad del agua y del aire, y para la salud de los animales y de los seres humanos.

En Estados Unidos, la estructura de la agricultura animal se ha visto drásticamente modificada durante las dos últimas décadas. Las explotaciones para engorde de animales se gestionan con un mayor número de animales concentrados en un menor número de granjas. El número total de cabezas se ha mantenido relativamente estable, pero el número total de animales estabulados ha crecido. Por ejemplo, los estudios del Departamento de Agricultura (USDA) señalan que, mientras el número total de unidades animales (UA) de cerdo ha aumentado un 16% entre 1982 y 1997 (pasando de 7,3 millones a 8,5 millones; y siendo 1 UA igual a 1.000 libras de peso de animal vivo (454 kg), los cerdos estabulados han aumentado el doble de esta tasa –un 31%–, pasando el número de animales mantenidos en lugares estabulados del 86% en 1982 al 97% en 1997 (Kellogg et al., 2000). Las explotaciones con menos de 150 UA de cerdo sufrieron un descenso del 70% entre 1982 y 1997, en contraposición con un aumento del 82% en el número de grandes explotaciones con 1.000 o más UA de cerdo. Por lo general, los cerdos estabulados se concentran en el Medio Oeste y en Carolina del Norte (fig. 1). Los mayores aumentos en explotaciones intensivas durante las dos últimas décadas se han

producido en Carolina del Norte, Oklahoma, Arkansas, norte de Iowa y sur de Minnesota (fig. 2). Sólo en Carolina del Norte, la producción porcina ha pasado de 2,6 millones de cabezas en 1990 a más de 9 millones en 1997.

La tendencia continuada hacia un menor número de explotaciones, pero de mayores dimensiones, unida a unos métodos más intensivos de producción y a la especialización, ha llevado a que se estén generando más nutrientes de estiércol, concentrados en áreas geográficas relativamente pequeñas. Muchas áreas norteamericanas están produciendo más nutrientes de los que la tierra de cultivo disponible puede asimilar, debido a una aportación neta de nutrientes que ingresan a la granja en el alimento. Pero el transporte de este estiércol en forma líquida no es factible. Por ello, ha crecido enormemente el interés por encontrar métodos alternativos, funcionales y costeables para la gestión de los nutrientes procedentes de la producción de animales estabulados. Para el conjunto de Estados Unidos, en 1997 hubo un total de 1.500 millones de libras (681 millones de kg) de exceso de nitrógeno a nivel de granja, que se reducen a 116 millones de libras (52,6 millones de kg) de exceso de nitrógeno a nivel de condado. Ello supone que la capacidad de asimilación de la tierra en la mayoría de los condados es adecuada para asumir el purín generado si pudiera resolverse el problema de la distribución desplazando el purín en el seno de un mismo condado. En cuanto al fósforo, constituye más que un problema. Cerca de una quinta parte (189 millones de libras-85,8 millones de kg) de los 929 millones de libras (421,7 millones de kg) del exceso de fósforo a nivel de granja excedieron de la capacidad de asimilación a nivel de condado (Kellogg et al., 2000). Ello indica que hace falta el transporte de fós-

foro a larga distancia para solventar el problema del exceso de nutrientes.

Además de los nutrientes (como nitrógeno y fósforo), el estiércol y las aguas residuales procedentes de las explotaciones de engorde de animales tienen el potencial de lanzar al medio ambiente otros elementos contaminantes, como materia orgánica, sedimentos, patógenos, metales pesados y amoníaco. En los ríos, la materia orgánica en descomposición puede reducir los niveles de oxígeno y causar la muerte de peces por asfixia. Los excesos de nutrientes en el agua pueden derivar en, o contribuir a, la eutrofización, la anoxia (es decir, bajos niveles de oxígeno disuelto), la proliferación de algas tóxicas que pueden causar daños a la salud humana y, en combinación con otras sustancias, han sido asociados a epidemias de *Pfiesteria piscicida* (USEPA, 2001). La moderna producción animal es un negocio sumamente sofisticado, y la depuración de sus residuos también tendrá que serlo. Conforme crece la práctica de la producción de animales en lugares estabulados, con mayor urgencia precisamos alternativas eficaces y costeables para la gestión de los subproductos de nutrientes de estas explotaciones a gran escala. Para abordar estos problemas, el Servicio de Investigación Agrícola del USDA (ARS) ha elaborado un programa nacional de investigación sobre "Utilización de los Estiércoles y de los Subproductos" (<http://www.nps.ars.usda.gov/>). Este programa nacional se centra en desarrollar las prácticas y las técnicas de gestión para optimizar la utilización agrícola del estiércol y de los demás subproductos, al tiempo que se protege la calidad medioambiental, la salud humana y la salud animal. El presente documento describe los avances habidos en técnicas de depuración del estiércol porcino en el Centro de Investigación del USDA-ARS de

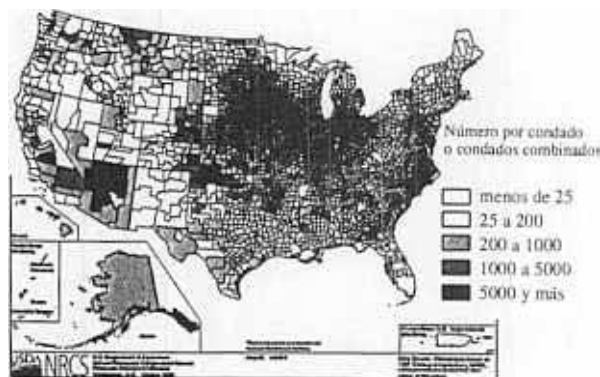


Fig. 1.— Unidades animales de porcino estabulado 1997.

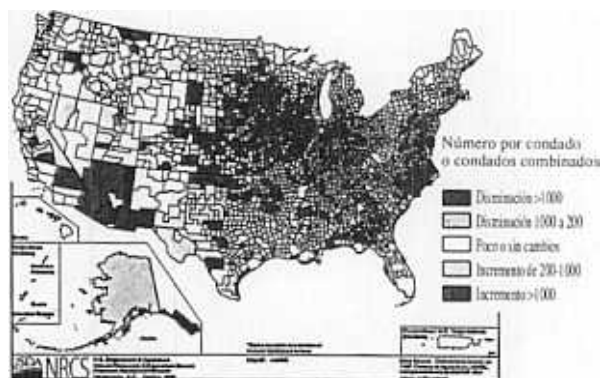


Fig. 2.— Cambios en unidades animales de porcino estabulado (1982-1997).

Coastal Plains, Florence, Carolina del Sur, encaminadas a abordar las áreas con mayores problemas de enriquecimiento del suelo por exceso de nutrientes, emisiones de amoníaco y control de microorganismos patógenos en explotaciones porcinas intensivas.

SISTEMA TRADICIONAL DE MANIPULACIÓN DEL PURÍN

Las instalaciones porcinas norteamericanas a gran escala utilizan algún tipo de sistema de transporte de agua

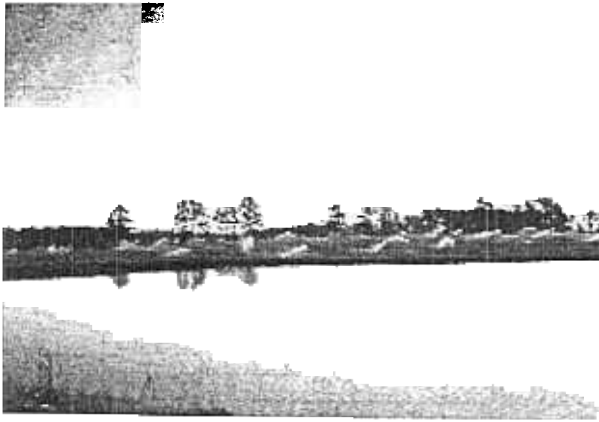


Fig. 3 Laguna anaerobia y campo de aspersión.

para desplazar los residuos desde el lugar de confinamiento. Están pensadas para recoger y trasladar el estiércol en forma líquida a una laguna anaerobia. Muchas de las nuevas instalaciones sitas en Carolina del Norte y del Sur utilizan una fosa de recarga o un sistema de manipulación de estiércol mediante descarga bajo el suelo acanalado y una laguna anaerobia (de 0,5 a 5 ha) para la depuración y el almacenamiento del purín. Normalmente, el líquido empleado para separar el estiércol del edificio es un reciclado del líquido que sobrenada en la laguna. El volumen del estiércol porcino es grande, sobre unos 26 litros por cerdo engordado, debido a la alta dilución debida al agua de limpieza. Esta dilución elevada tiene como resultado que el agua que sale del edificio posee una muy baja concentración de sólidos, entre 1,5% y 2,6% de materia sólida. Por lo general, el líquido excedente de la laguna se aplica por aspersión en los campos de pasto cercanos (fig. 3).

Ésta es la tecnología tradicional –también denominada tecnología de lagunaje/campos de aspersión–, que en muchos Estados es objeto de serias críticas. En Carolina del Norte, las estima-

ciones sobre las emisiones de amoníaco procedentes de las lagunas porcinas indican que todos los días pueden volatilizarse unos 30.000 kg de nitrógeno procedentes de un total de 2.000 hectáreas de lagunas (Crouse et al., 1997).

TÉCNICAS ALTERNATIVAS

Si bien existen muchas técnicas procedentes del sector de la depuración de aguas residuales urbanas que pueden aplicarse en la resolución de los problemas de los residuos animales, las estrategias para una depuración fructífera de estos residuos son diferentes de las que conciernen a las depuraciones de las aguas municipales. Existen diversos aspectos de los estiércoles animales, como sus características residuales, la participación del explotador, las disposiciones reglamentarias y los recursos fiscales, que son tan completamente diferentes que exigen una tecnología de depuración de nueva generación, desarrollada expresamente para sistemas de residuos animales. Todas las explotaciones de engorde de animales (AFO) deberán desarrollar unos Planes de Gestión Global de Nutrientes (CNMP) específicos para el lugar, a fin de minimizar el potencial de los contaminantes del agua procedentes de las instalaciones intensivas y la aplicación de estiércol y subproductos orgánicos en suelo (USDA, 2001). Parte integrante del CNMP en su conjunto podría ser la utilización de alternativas de aplicación en suelo de estiércol y subproductos orgánicos que resulten seguras a nivel medioambiental. Tales alternativas son necesarias en áreas en las que el suministro de nutrientes supera la tierra disponible para acogerlos y/o en donde la aplicación en suelo podría comportar riesgos medioambientales significativos. Se precisan métodos más eficientes y rentables para la manipulación del estiércol, su depuración y almacenamiento. Las áreas

en las que hay que centrarse son las siguientes (USDA, 2001):

- Mejoras en los sistemas de extracción de la fracción sólida del purín.

- Mejoras en la manipulación del estiércol, el almacenamiento y los métodos de depuración, a fin de reducir la volatilización del amoníaco.

- Sistemas de depuración que transformen y/o capturen los nutrientes, los oligoelementos y las sustancias químicas farmacéuticamente activas del estiércol.

- La mejora de la técnica de compostaje y demás técnicas de estabilización del estiércol.

- Sistemas de depuración que subsanen o sustituyan las lagunas anaerobias.

Los Planes de Gestión Global de

Nutrientes van a desempeñar un papel destacado en el futuro de los criadores de cerdos. El Consejo Nacional de Productores de Porcino (NPPC) ha desarrollado un programa para aumentar la concienciación y asistir a los criadores y asesores del sector porcino en el desarrollo y la ejecución del CNMP. En la figura 4 aparece un diagrama de flujos de las diferentes opciones existentes, distintas del esparcimiento del estiércol en granjas de productores, identificadas por el NPPC (otras alternativas de uso, equipo de trabajo, Rickman y col.,2001).

Aunque algunas de las técnicas se encuentran actualmente en fase de investigación, el diagrama ilustra dos enfoques distintos sobre la gestión de los estiércoles. Uno consiste en desarrollar sistemas secos como las estructuras de piso alto (*high ri-*

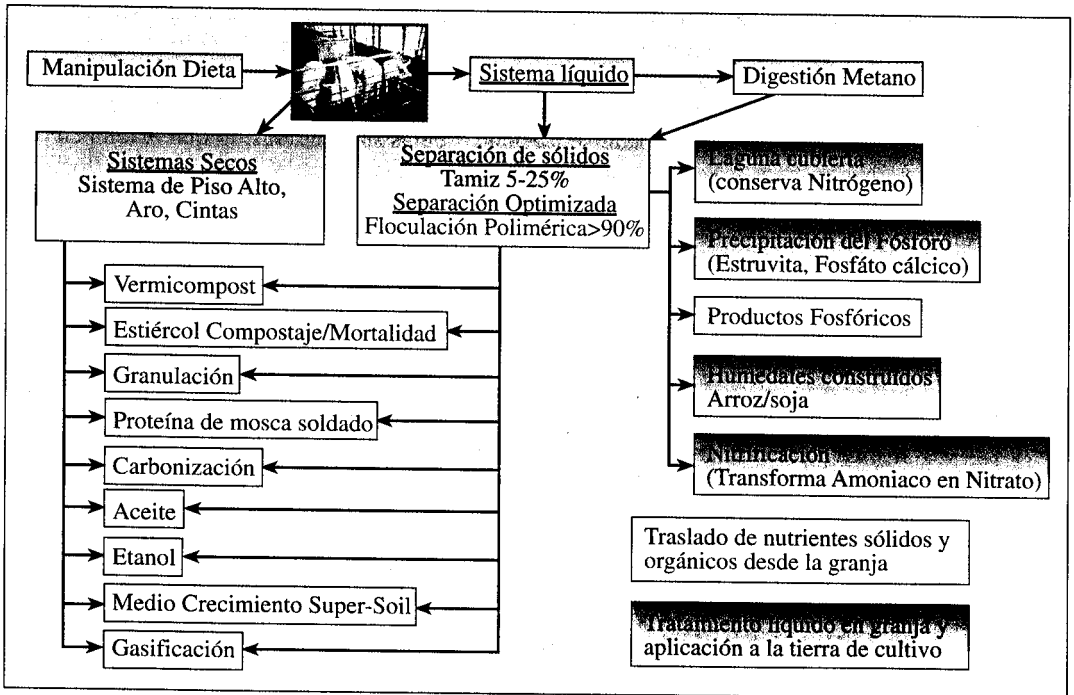


Fig. 4.— Tecnologías alternativas al sistema tradicional de Lagunaje. Diagrama de flujo preparado por el equipo de trabajo de usos alternativos del Consejo Nacional de Productores de Porcino.

se) o de aro-banda (*hoop*), en donde el estiércol fresco se mezcla con un agente voluminizador, o bien en utilizar cintas inclinadas bajo el suelo acanalado para separar orinas y sólidos, a fin de que todo o parte del estiércol que salga de un edificio sea manejado directamente como sólido. El otro enfoque es mejorar o reajustar los sistemas líquidos existentes, para que los nutrientes sólidos y orgánicos volátiles se separen del estiércol fresco y sean transportados y depurados con una serie de técnicas que generen productos revalorizados. Tales productos incluyen sustitutos de turba estabilizados, humus, fertilizantes orgánicos, enmiendas del suelo, energía y proteínas. El líquido sobrante debe ser depurado en la granja. Aquí también puede utilizarse una serie de procesos biológicos, físicos o químicos para conseguir objetivos específicos de la gestión de nutrientes. Es obvio que para mejorar de manera significativa los sistemas líquidos necesitamos tecnologías que puedan proporcionar una separación efectiva de sólidos/líquidos. Dicha tecnología es, por ejemplo, la utilización de polímeros, en donde se flocculan partículas finas típicas del purín porcino, produciendo un aumento de la separación superior al 90%. Esta superior recuperación de sólidos no sólo convierte el uso de una depuración avanzada del líquido en una alternativa más económica, sino que aumenta la cantidad de materiales disponibles para la operación de procesamiento de los sólidos, lo que genera un flujo de ingresos. La parte restante del documento tratará algunas de las nuevas tecnologías que podrían ser parte del fundamento de dichas soluciones.

SEPARACIÓN OPTIMIZADA DE SÓLIDOS-LÍQUIDO

La separación de los sólidos en suspensión del purín de cerdo mediante el uso de tamices y prensas resulta muy

poco eficiente (del 5% al 15%), y requiere aglutinar las partículas pequeñas de sólidos en grupos de mayores dimensiones. Los flocculantes inorgánicos, como las sales de aluminio o calcio y hierro, son eficaces, pero poseen una aplicación limitada a causa de las grandes cantidades de material que se precisa (> 1.500 mg/l) y la gran cantidad de sólidos adicionales que se generan (Loehr, 1973). Nuestro trabajo en la separación de sólidos mediante el uso de polímeros orgánicos (Vanotti y Hunt, 1996, 1999) indica que el tratamiento con el polímero poliacrilamida (PAM) no solamente resulta muy eficaz en la flocculación del total de sólidos suspendidos totales (SST) y en la separación de los nutrientes orgánicos de las aguas residuales porcinas, sino que también requiere una dosis química muy baja. Las poliacrilamidas son moléculas poliméricas de cadena larga solubles en agua que desestabilizan las partículas en suspensión cargadas, adsorbiéndolas y tendiendo puentes entre varias partículas suspendidas, lo que resulta en partículas nuevas y más grandes (flóculos) que pueden separarse fácilmente mediante tamices y filtros. La evaluación de los PAM catiónicos, aniónicos y neutros ha mostrado que el tipo catiónico es muy eficaz para agrupar pequeñas partículas coloidales tanto en purín de cerdo (Vanotti y Hunt, 1999) como en purín de vaca (Chastain y Vanotti, 2000). Dentro de los PAM catiónicos, los materiales que poseían una densidad de carga moderada (20%) solían ser más eficaces que los polímeros con una densidad de carga superior.

Se han obtenido unas eficiencias de separación excelentes utilizando tamices o filtros tras la flocculación con PAM. Se recomiendan los tamices de 0,2 a 1 mm de tamaño, obteniéndose las mayores eficiencias (del 5% al 10%) con los ta-

mices menores de su gama. Pero especial consideración merece el diseño del equipo, a fin de evitar que se obstruya. La eficiencia desciende de forma considerable (por debajo del 70%) con tamaños de tamiz > 1,5 mm. SELCO M.C. de Castellón (España) ha desarrollado con éxito un sistema en el que los floculos se separan con un tamiz rotatorio autolimpiante de una abertura de 0,2 mm, seguido de un tamiz vibrador y un filtro prensa, para obtener un material sólido con > 50% de materia seca y un material líquido con > 97% de reducción en los sólidos en suspensión y 84% de reducción en DBO. Con el purín de cerdo se han empleado con éxito diferentes materiales de filtración, tales como filtros prensa, filtros de banda y filtros de arena, una vez realizada la floculación polimérica. Un ejemplo de prensa lo constituye la cámara de compresión con filtro de plástico desarrollada por Ecoliz, de Bretaña, Francia. Bioresource, de Iowa (EE.UU.) ha desarrollado un filtro de banda. Y Deskins, de Indiana (EE.UU.), ha propuesto un lecho de filtrado de arena con secado rápido para lograr la captación de los sólidos y la deshidratación (Vanotti et al., 2000, 2001). La separación de sólidos con PAM reduce hasta un 98% los sólidos en suspensión (fig. 5), lo que permite una depuración económica de los purines por aireación. Al capturar las partículas suspendidas, también retiramos del flujo líquido la mayor parte de los compuestos orgánicos volátiles y que requieren oxígeno. En lugar de descomponer los compuestos orgánicos, el oxígeno del tratamiento por aireación subsiguiente a la separación de los sólidos se utiliza en forma eficiente para convertir el amoníaco en el proceso de nitrificación.

La concentración de nutrientes orgánicos en el efluente depurado tam-

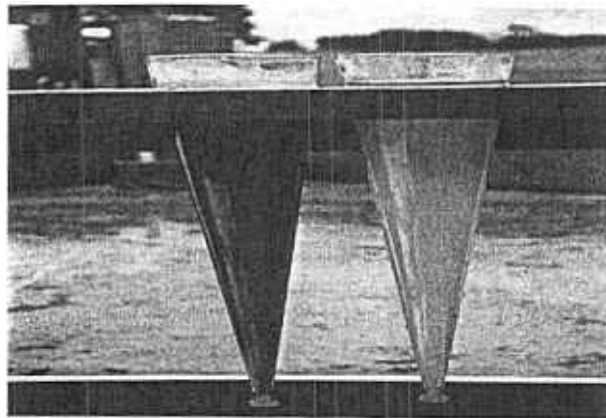


Fig. 5.— Tratamiento con PAM.

bién descendió de forma significativa con el tratamiento PAM (tabla I). La concentración global de fósforo en las descargas variaron de 90 a 620 mg/l. Aproximadamente un 88% eran formas orgánicas y el resto eran fosfatos solubles. En cuanto al nitrógeno, la concentración de TKN osciló de 300 a 1140 mg/l, con cerca de un 64% de nitrógeno orgánico y un 36% de nitrógeno amoniacal. Los nutrientes orgánicos fueron separados de forma eficiente mediante la floculación PAM. No obstante, los componentes de amoníaco y fosfato soluble no han decrecido con el tratamiento PAM, y han precisado un tratamiento ulterior. Por lo general, la separación de nitrógeno y fósforo orgánicos se sigue con una relación aproximada de 1:1, con los sólidos en suspensión capturados mediante PAM (fig. 6).

Por término medio, se han retirado de la fase líquida 7,25 g de nitrógeno y 3,3 g de fósforo por cada 100 g de materia seca separados mediante el tratamiento PAM.

Siempre es más económico utilizar PAM para separar sólidos y nutrientes de las aguas residuales porcinas cuando la concentración es superior. Este

TABLA I Separación optimizada de sólidos y nutrientes del purín porcino limpiado con descarga líquida utilizando la separación del polímero poliácridamida (PAM)*

Componente de la descarga	Tanque de homogeneización (mg/l)	Efluente depurado PAM (mg/l)	Eficiencia de separación (%)
Sólidos suspendidos totales (SST)	5.846	141	98
Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	4.775	118	98
DBO	2.576	387	85
Total de n-Kjeldahl	555	224	60
P total	245	62	75
N orgánico	353	40	89
P orgánico	215	14	93

*Los datos son la media de 27 ensayos realizados a lo largo de 1 año. Gama de variaciones iniciales de concentración: SST = de 1,3 a 15,7 g/l; SSV = de 1,1 a 13,5 g/l; DBO = de 0,6 a 8,5 g/l.

extremo queda reflejado en la figura 7, con motivo de un experimento con purines de concentración diferente. En dicho experimento, cuatro granjas de cerdos realizadas con suelos acanalados y que contenían 4.800 cerdos cada una fueron limpiadas cinco veces al día a

una media de 25 litros por cerdo y día. Dado que el volumen del agua descargada se mantuvo constante durante las 16 semanas que duró la evaluación, la concentración de las aguas residuales aumentó (pasando su total de sólidos 5 a 25 g por litro) con el tamaño de los

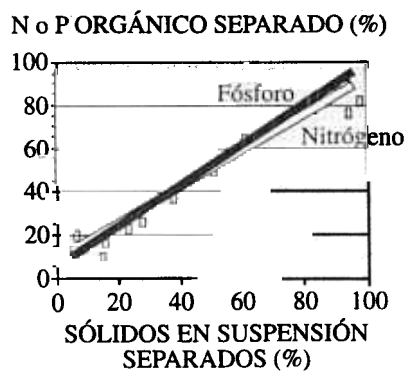


Fig. 6. Los nutrientes orgánicos del purín porcino líquido están contenidos en una mayor parte en las partículas finas que se separan con la PAM. Datos de Vanotti y Hunt (1999).

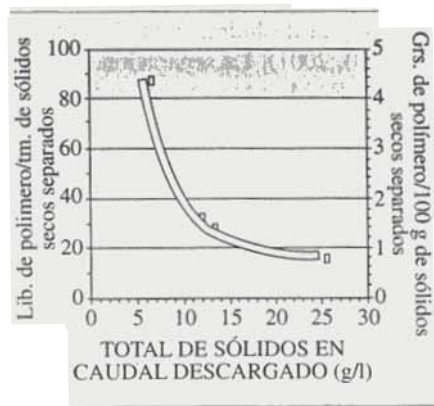


Fig. 7. El consumo de polímero es menor cuando se incrementa la concentración de sólidos en el purín líquido. Vanotti et al., 1999a.

cerdos (que a su vez pasó de 18 a 109 kg). La tasa de uso del polímero para el agua residual más diluida (5 g de sólidos totales por litro) era superior al 4% (gramos de polímero por 100 g de materia seca separados), mientras que la tasa de uso obtenida con las aguas residuales de mayor concentración (25 g de sólidos totales por litro) fue del 0,9%. El coste químico calculado asociado a una tasa de utilización de polímero del 0,9% y a un índice de separación de sólidos en suspensión del 97% es aproximadamente de 1,38 USD por cerdo engordado. De este modo, pequeños ajustes de gestión, como la reducción de la frecuencia de las limpiezas en periodos en que la producción de purín es baja puede suponer unos ahorros significativos (un 400%) en los costes totales de separación por polímeros.

TRATAMIENTO DE NITRIFICACIÓN

Aunque casi todo el nitrógeno orgánico se remueve con los sólidos suspendidos, una cantidad significativa del nitrógeno total continúa en la fracción soluble amoniacal. Así, después de haber retirado los sólidos, el agua residual debe ser tratada para transformar el amoníaco cuando se necesitan alternativas distintas a la aplicación en suelo. Una de las principales transformaciones en este tratamiento es la conversión del nitrógeno amoniacal en nitrógeno nítrico a través de la nitrificación microbiana. La supresión biológica de nitrógeno a través del proceso de nitrificación y desnitrificación es vista como el método más eficiente y económicamente más viable de que se dispone para separar el nitrógeno de las aguas residuales (Tchobanoglous y Burton, 1991). Los nitrificadores necesitan oxígeno, dióxido de carbono, un área superficial y una fase de crecimiento antes

de que estén presentes en número suficiente para una nitrificación efectiva. Se ha procedido a evaluar el tratamiento aerobio para la depuración de las aguas residuales animales, pero en ausencia de poblaciones nitrificantes enriquecidas el tratar aerobiamente las aguas residuales de origen animal con altas concentraciones de amoníaco puede acentuar los problemas medioambientales al evacuar amoníaco a la atmósfera (St. Arnaud y otros, 1991; Burton, 1992).

La elevada concentración de bacterias nitrificantes en tanques de reacción también es viable con la tecnología de las bacterias nitrificantes inmovilizadas en polímeros (PINBT). Mediante el proceso de inmovilización, se aporta un entorno muy adecuado a los microorganismos para alcanzar una eficacia óptima. Los nitrificadores quedan atrapados en gránulos o pellets de 3 a 5 mm constituidos por polímeros como PVA o PEG, que son permeables al NH_3 , al oxígeno y al dióxido de carbono que precisan estos microorganismos. Ya ha quedado demostrada la aplicación exitosa de esta técnica en las aguas residuales de origen animal, proporcionando una supresión rápida y eficiente del amoníaco (Vanotti y Hunt, 1998 y 2000). La tecnología utiliza un gran número de nitrificadores inmovilizados en los tanques de reacción, los cuales poseen un tamiz para retener los gránulos y un sistema de aireación para la fluidificación (fig. 8; Vanotti et al., 2000b).

Dado que el amoníaco en concentraciones elevadas es tóxico para los nitrificadores, se precisa un periodo aproximado de aclimatación de dos meses, para lograr que las bacterias inmovilizadas se aclimaten perfectamente a las aguas residuales porcinas (fig. 9).

Concluida dicha aclimatación, los pellets proporcionan un índice de depuración muy elevado y resultan útiles

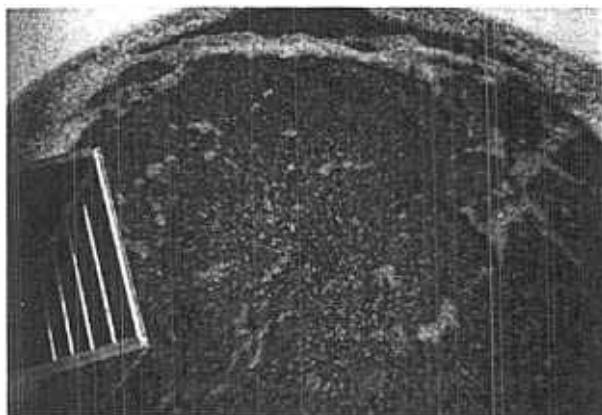


Fig. 8.— Pellets nitrificantes en reactor

durante más de 10 años. Ello supone que el granjero no tiene que cambiar, inocular, complementar o reciclar los cultivos de nitrificación para conseguir una depuración amoniacal de alto rendimiento. Los nitrificadores adaptados a las altas concentraciones de amoníaco también han logrado desarrollarse e in-

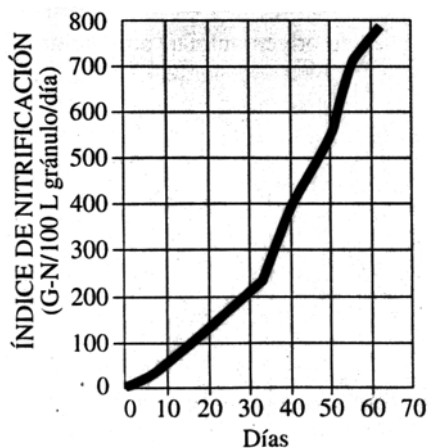


Fig. 9.— Los pellets nitrificantes son completamente aclimatados a las aguas residuales porcinas en un periodo de aproximadamente dos meses.

movilizarse con éxito en pellets poliméricos y se han utilizado para depurar aguas residuales porcinas en una serie de efluentes de purines de cerdo que contenían de 350 a 2.600 mg N/l (Vannotti et al., 1999b). Se han obtenido unas tasas de supresión del amoníaco de 915 a 990 mg N/l por reactor y día, y del 97% al 100% de eficacia de nitrificación, en el tratamiento por lotes, sin inhibición alguna en los residuos animales con elevada concentración amoniacal (tabla II).

TRATAMIENTO DE DENITRIFICACIÓN

Los procesos de denitrificación biológica pueden conjugarse con un reactor de nitrificación, a fin de conseguir la supresión total del nitrógeno. Dado que las bacterias responsables de la denitrificación biológica bajo condiciones de anoxia son heterotróficas, necesitan como fuente de energía una fuente apropiada de carbono orgánico. En la depuración de aguas residuales pueden utilizarse dos tipos fundamentales de fuente de carbón orgánico: o bien un fuente endógena contenida en las propias aguas residuales, o bien una fuente externa como metanol, etanol, etc. En el primer caso, el proceso conduce a un esquema de flujos de predenitrificación que recicla una parte del efluente nitrificado en un tanque anóxico, y en el segundo caso a una configuración de postdenitrificación. La ventaja de la configuración de predenitrificación a efectos de la supresión total de nitrógeno es que éste utiliza una fuente disponible de forma natural a partir de las aguas residuales, que minimiza la necesidad de carbono suplementario. En este proceso también reducimos la carga orgánica en el tanque de nitrificación. El sistema Biogreen que se muestra en la figura 10 ilustra dicha tabla de configura-

TABLA II Tratamiento discontinuo de aguas residuales ganaderas con alta carga de amonio con pellets nitrificantes

Concentración inicial de amoniaco Mg/N/l	Tasa de eliminación de amoniaco Mg N/l-reactor/día	Concentración final de nitrato Mg/N/l	Eficiencia (%)
344	991	348	100
860	924	855	99
1.570	917	1.525	97
2.608	1.013	2.569	99

ción de predenitrificación asociada al reactor PINBT. Puede utilizarse un tanque de postdenitrificación si se precisa descargar un efluente de calidad. El sistema piloto Biogreen ha sido probado con descarga de estiércol porcino utilizando el efluente después de la separación PAM, en un estudio realizado en el Centro de Residuos de Origen Animal

de la NCSU de Raileigh, NC (Becker, 2001; Vanotti et al., 2001).

La supresión del nitrógeno presenta unas eficacias del 93% para el nitrógeno total y del 99% para el amoniaco (tabla III). La nitrificación produce acidez y consume alcalinidad, pero normalmente no se precisa ningún suplemento cuando se utiliza

TABLA III Calidad del agua en aguas residuales de ganado porcino, obtenida con un sistema Biogreen de nitrificación/denitrificación después de la separación de sólidos/líquido

	Calidad del caudal de entrada	Efluente depurado
pH	7,7	7,9
Alcalinidad, mg/l	1.378	653
Sólidos en suspensión, mg/l	135	110
DQO, mg/l	1.527	220
NH ₄ -N, mg/l	231	
NO ₃ -N, mg/l	0	5
Kjeldahl-N, mg/l	259	19

*Evaluación en la planta piloto de Raileigh, NC. Flujo continuo con un tiempo de retención de 13 horas para el tanque de nitrificación y de 31 horas para el tanque de denitrificación. El tanque de nitrificación contenía un 18% de pellets de PEG.

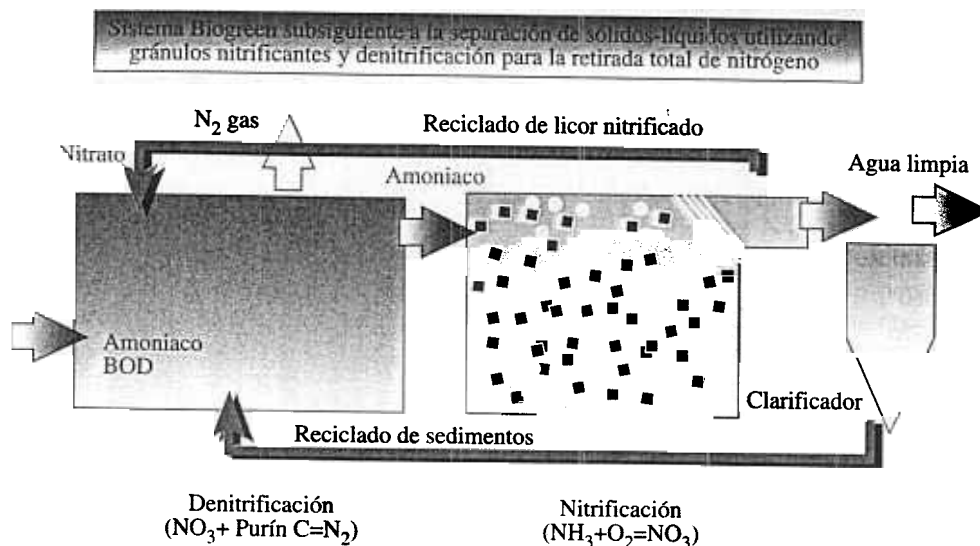


Fig. 10. Sistema Biogreen de tratamiento de nitrógeno.

una configuración de predenitrificación.

Una consideración importante de cara a la denitrificación es la ratio entre DQO

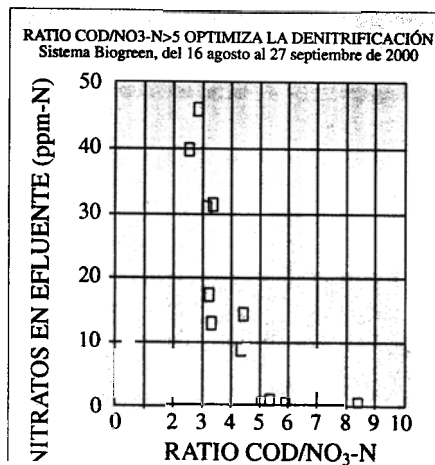


Fig. 11 Carbono soluble que no se separa con PAM es necesario para una denitrificación completa.

y los nitratos aplicados al reactor anóxico. Las ratios bajas constituyen un problema. La eficacia de la denitrificación biológica aumenta cuando la ratio DQO/N oxidado aumenta a un valor óptimo de 5 a 7, por encima del cual las prestaciones ya permanecen constantes (fig. 11).

El ratio habitual DQO/N oxidado después de la separación PAM es de 6 a 11, por lo que una escasez de carbono no es importante. Otro aspecto relevante del proceso de desnitrificación aplicado al purín de origen porcino es el riesgo de producción de óxido nitroso, un gas de invernadero, en lugar de gas N_2 . Bernet y sus colaboradores (1996) han estudiado el problema, y sus resultados muestran que cuando la ratio carbono orgánico/nitrato se situaba entre 1,6 y 2,4, el nitrato quedaba totalmente reducido, pero había óxido nitroso en el gas generado. En cambio, cuando la ratio TOC/N nítrico era superior a 2,4, el nitrato quedaba completamente reducido a

nitrógeno molecular. En la figura 11, una ratio TOC/N nítrico de 2,4 es aproximadamente igual a una ratio DQO/N nítrico de 6,4. Por consiguiente, la generación de óxido nitroso puede eliminarse utilizando proporciones adecuadas entre carbono y nitrógeno, o bien completando con metanol cuando las aguas residuales sean de escasa concentración (< 0,5% de TSS antes de la separación PAM).

También puede aplicarse la tecnología de inmovilización para reforzar el proceso de denitrificación. Utilizando denitrificadores incorporados a perlas poliméricas de PVA (fig. 12), hemos obtenido una denitrificación extremadamente rápida de las aguas residuales de origen porcino, en concreto 138 mg N/L por reactor y hora (fig. 13).

Comparada con el sedimento de denitrificación estándar, el empleo de denitrificadores inmovilizados puede reducir en unas 10 veces el tamaño de los tanques de depuración, lo que resulta en un sistema de dimensiones compactas y más económico, con grandes ventajas para los sistemas animales. Dicho sistema ha sido probado con éxito en combinación con los nitrificadores inmovilizados en un prototipo de laboratorio (fig. 14).

EXTRACCIÓN DEL FÓSFORO

Uno de los principales problemas principales en cuanto a sostenibilidad es el desequilibrio del nitrógeno y el fósforo aplicados a la tierra. Tradicionalmente, en Estados Unidos para disponer de los estiércoles se efectúan aplicaciones basadas en el nitrógeno. Pero los nutrientes del estiércol no están presentes en la misma proporción que necesitan las cosechas, y cuando el estiércol se aplica en base a las necesidades de nitrógeno de las cosechas se

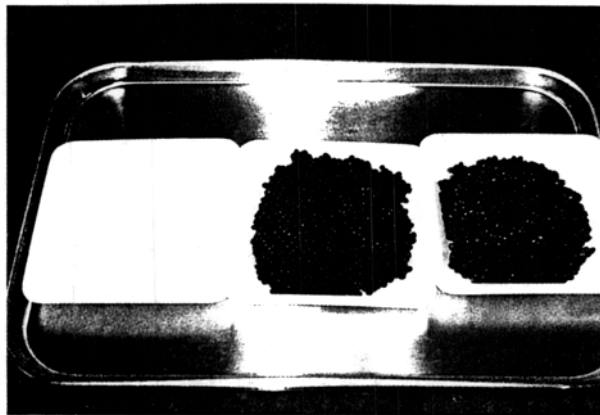


Fig. 12.— Esferas de nitrificación (centro) y denitrificación derecha) con soporte de PVA (izquierda).

produce un exceso de aplicación de fósforo, lo que resulta en una acumulación del mismo en el suelo, en una escorrentía de fósforo y en una eutrofización de las aguas superficiales. Los reglamentos propuestos (USEPA, 2001) para regular la contaminación del agua procedente de las explotaciones intensivas de engorde de animales

Retirada de nitratos mediante denitrificación inmovilizados

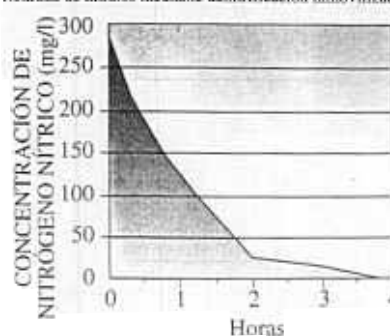
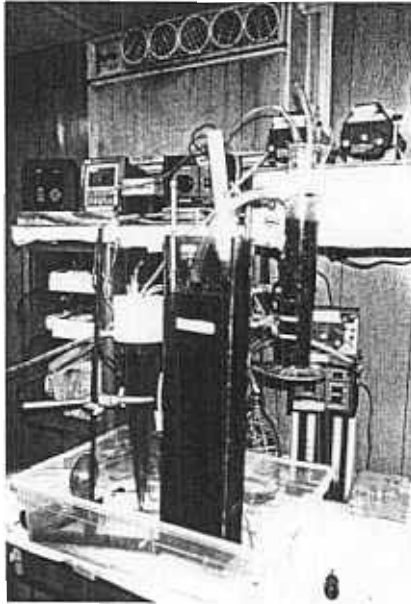
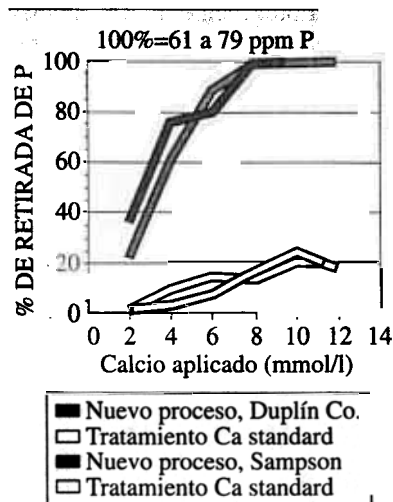


Fig. 13.— Comparada con el fango de denitrificación estándar, el uso de la tecnología de nitrificador inmovilizado puede reducir 10 veces el tamaño de los tanques de tratamiento.



Sistema de nitrificación/denitrificación inmovilizado.



Fig

Eliminación del fósforo del agua residual porcina utilizando el nuevo proceso USDA comparado con el proceso estándar.

señalan que en el futuro el equilibrio del fósforo en el suelo puede jugar un papel significativo para la gestión del purín y de los nutrientes. En los sistemas de animales en los que la depuración por PAM se aplica a los sólidos separados, en torno a un 75% del fósforo total contenido en el purín porcino se retira con los sólidos (tabla I). Esta estrategia es coherente con los objetivos de la industria de eliminar la mayor cantidad de fósforo posible, al objeto de que la capacidad de asimilación del fósforo por la tierra que circunda la explotación intensiva no se vea superada. Este tratamiento también mejora la ratio N/P del efluente líquido restante, dado que en la fracción orgánica retirable se retiene más fósforo en comparación con el nitrógeno. En otras situaciones un granjero puede, por ejemplo, necesitar separar todo el fósforo para cumplir con los reglamentos medioambientales o para poder ampliar la explotación existente. En tal caso, puede recomendarse un módulo de remoción del fósforo. Para tratar este problema, hemos desarrollado un método de extracción del fósforo de las aguas residuales porcinas que es adecuado tanto para mejorar el efluente de las lagunas como para sistemas líquidos que carecen de laguna. El método utiliza cal viva para precipitar el fósforo en forma de fosfato cálcico (fig. 15). El producto fosfórico contiene alrededor de un 17% de P_2O_5 , y está deshidratado en > 50% de los sólidos utilizando bolsas filtrantes. Se recomienda un bajo contenido de humedad para el transporte económico fuera del área de producción.

REDUCCIÓN DE PATÓGENOS

La contaminación del agua, de los alimentos y del aire por agentes patógenos potencialmente presentes en el es-

tiércol y en los subproductos, y por medio de bioaerosoles, es un problema que genera creciente preocupación. Es bien conocido el valor de los diferentes procesos de compostaje para destruir los microorganismos infecciosos en el estiércol sólido. Sin embargo, existe una falta de información en cuanto a los índices de destrucción de patógenos con los nuevos tratamientos. Datos recientes para una secuencia de tratamiento en la que el purín recibe una depuración polimérica PAM seguida de nitrificación/denitrificación y retirada del fósforo indican que dichos tratamientos también son efectivos para el control de patógenos. Los análisis sobre calidad microbiana efectuados en el ARS-Laboratorio de Patógenos de Aguas Residuales de Origen Animal, en los que se han utilizado técnicas de electroplastia espiral (*spiral plating*), indican que los patógenos del estiércol y los microbios indicativos tales como los coliformes totales y fecales ($2,14 \times 10^6$ cfu/ml), enterococos ($1,75 \times 10^6$ cfu/ml) y salmonellas ($4,50 \times 10^6$ cfu/ml) se reducen un log tras la depuración polimérica. Los patógenos se reducen 3 logs en una combinación de supresión de sólidos y tratamiento de nitrificación/denitrificación utilizando condiciones aerobias y anóxicas. La mayor reducción se produce con el tratamiento de extracción del fósforo en la secuencia con una reducción total de como mínimo 4 logs debido al efecto de un pH elevado durante la formación del fosfato cálcico.

PROYECTO DE DEMOSTRACIÓN

Existe actualmente en Carolina del Norte un marco sectorial-gubernamental para la conversión de las lagunas anaerobias de residuos porcinos y de los campos de aspersión en tecnologías alternativas. En julio de 2000, el Fiscal General de Carolina del Norte alcanzó un acuer-

do con Smithfield Foods, Inc. y sus empresas subsidiarias, el mayor grupo de producción de cerdos del mundo, para desarrollar y demostrar las cualidades de las Tecnologías Medioambientales Superiores. Una vez identificadas las nuevas tecnologías, las empresas transformarán sus instalaciones e irán reduciendo las actuales lagunas y campos de aspersión. En octubre de 2000, el Fiscal General alcanzó un acuerdo similar con Premium Standard Farms, el segundo mayor productor de cerdos del país. En conjunto, Smithfield y Premium Standard representan más del 75% de las granjas porcinas de Carolina del Norte. El Acuerdo define las Tecnologías Medioambientales Superiores como toda aquella tecnología o combinación de tecnologías que reúna las siguientes características:

- Que sea autorizada por las autoridades gubernamentales competentes.
- Que se determine que es técnica, operativa y económicamente viable.
- Que reúna los siguientes requisitos en cuanto a prestaciones:
 - Que elimine el vertido de residuos animales en las aguas superficiales y subterráneas mediante descarga directa, infiltración o escurrentía.
 - Que elimine de forma sustancial las emisiones de amoníaco a la atmósfera.
 - Que elimine de forma sustancial la emisión de malos olores perceptibles más allá de los límites de la granja.
 - Que elimine de forma sustancial la liberación de portadores transmisores de enfermedades y de agentes patógenos transportados por el aire.
 - Que elimine de forma sustancial la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas con nutrientes y metales pesados.

Se ha seleccionado un sistema de depuración a escala industrial utilizan-

do las tecnologías alternativas que se reseñan en el presente documento mediante un proceso de examen de competitividad realizado al amparo de esta iniciativa, para una demostración a escala industrial y una verificación de los resultados medioambientales en una granja de 4.360 cerdos sita en el condado de Duplin, Carolina del Norte.

(<http://www.ars.usda.gov/is/pr/2001/010719.htm>).

El sistema separa los sólidos de los líquidos utilizando tecnología polimérica y el módulo Ecopurín de Selco M.C. (España), forma un medio de crecimiento Supersoil a partir de sólidos estabilizados utilizando tecnología Super Soil Systems (EE.UU.), retira el nitrógeno de las aguas residuales con tecnología PINBT utili-

zando el módulo Biogreen de Hitachi Plant Engineering & Construction Co. (Japón), retira el fósforo utilizando tecnología USDA-ARS y recicla agua limpia para la limpieza de las pocilgas.

Con los avances de las nuevas tecnologías de depuración pueden obtenerse grandes beneficios en la cría de animales y en el medio ambiente. Ello requerirá una fusión de conocimiento y técnicas de innovación. Existen muchos obstáculos, unos evidentes y otros sutiles, que deben superarse cada vez que se introduce una nueva manera de hacer las cosas. Sin embargo, la historia ha demostrado en innumerables ocasiones que, cuando en Estados Unidos los recursos públicos y privados se concentran en un problema, las soluciones se encuentran.

BIBLIOGRAFÍA

- Becker H. 2001. Coping with swine manure: State-of-the-art technology cleans up wastewater from large-scale animal production. USDA Agricultural Research, julio 2001. www.ars.usda.gov/is/AR/archive/jul01/swine0701.htm
- Bernet N, Degenes N, Moletta R. 1996. Denitrification by anaerobic sludge in piggery wastewater. *Environmental Technology* 17: pp. 293-300.
- Burton CH. 1992. A review of the strategies in the aerobic treatment of pig slurry: Purpose, theory and method. *J. Agric. Eng. Res.* 53: pp. 249-272.
- Chastain, JP y Vanotti, MB 1999. Effectiveness of liquid-solid separation for treatment of flushed dairy manure: A case study. ASAE Documento # 99-4046. 20 pp.
- Crouse DA, Hodges SC, Robarge WP, Mikkelsen RL, Havlin y JL. 1997. Nitrogen budget for a swine production facility in North Carolina. En *Agron. Abstracts*. Madison, Wis.: ASA.
- Kellog RL, Lander CH, Moffitt DC, Gollehon N. 2000. Manure nutrients relative to the capacity of cropland and pastureland to assimilate nutrients: Spatial and temporal trends for the United States. USDA NRCS y ERS, GSA Publ. N°. nps00-0579.
- Loehr RC. 1973. Development and demonstration of nutrient removal from animal wastes. Informe EPA R2-73-095. Washington, D.C.: Agencia de Protección Medioambiental.
- St.Arnaud S, Bisailon JG, Beaudet R. 1991. Microbiological aspects of ammonia oxidation of swine waste. *Can. J. Microbiol.* 37: pp. 918-923.
- Tchobanoglous G, Burton FL. 1991. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. Irwin/McGraw-Hill.


- 
- USDA. 2001. Comprehensive Nutrient Management Planning Technical Guidance. http://www.nhq.nrcs.usda.gov/PROGRAMS/ahcwpd/awd_index.htm
- USEPA. 2001. Proposed regulations to address water pollution from concentrated animal feeding operations. EPA 833-F-00-016, enero 2001, Oficina del Agua, Washington, D.C. 20460.
- Vanotti MB, Hunt PG. 1996. The use of polymers for nitrogen removal in swine wastewater: PAM and encapsulated nitrifier technologies. En Proc. of Solutions: A Technical Conference on Water Quality, pp. 116-120. Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, N.C., 19-21 marzo.
- Vanotti MB, Hunt PG. 1998. Ammonia removal from swine wastewater using immobilized nitrifiers. pp. 427-438. En Proc. 8ª Conferencia Internacional sobre Estrategias de Gestión para el Uso de Residuos Orgánicos en la Agricultura, FAO Ramiran 98, Rennes, France, 26-28 mayo.
- Vanotti MB, Hunt PG. 1999. Solids and nutrient removal from flushed swine manure using polyacrylamides. Transactions of the ASAE 42(6): 1833-1840.
- Vanotti MB, Hunt PG. 2000. Nitrification treatment of swine wastewater with acclimated nitrifying sludge immobilized in polymer pellets. Transactions of the ASAE 43: pp. 405-413.
- Vanotti MB, Rice JM, Hunt PG, Humenik FJ. 2000a. Advanced treatment system for liquid swine manure using solid-liquid separation and nutrient removal unit processes. pp. 393-400. ASAE, 8º Simposio Internacional sobre Residuos de Origen Animal, Agrícola y de Elaboración de Alimentos (ISAAFPW 2000). Des Moines, IA.
- Vanotti MB, Hunt PG, Rice JM, Humenik FJ. 2000b. Nitrifying high-strength wastewater. Industrial Wastewater, sept./oct.: pp. 30-36. Water Environment Federation, Alexandria, VA.
- Vanotti MB, Hunt PG, Rashash DMC. Nutrient separation from liquid manure using PAM. Agron. Abst. pp. 33-34. 1999a.
- Vanotti MB, Nakaoka M, Hunt PG, Ellison A, Odamura S. 1999b. Treatment of high-ammonia animal wastewater with nitrifying pellets. Documento 99-4092. St. Joseph, Mich:ASAE.
- Vanotti MB, Hunt PG, Ellison AQ, Szogi AA, Rice JM, Humenik FJ, Baird CL. 2001. Nutrient Removal from Liquid Swine Manure Using PAM, Nitrification/ Denitrification and Phosphorus Treatment. En Agron. Abstracts. Madison, Wis.: ASA.
-

TABLA III Tratamiento al continuo de aguas residuales municipales con alta carga de amoníaco con pellets de nitrificación

Concentración inicial de amoníaco Mg/N/l	Tasa de eliminación de amoníaco Mg N/l-reactor/día	Concentración final de nitrato Mg/N/l	Eficiencia (%)
344	991	348	100
860	924	855	99
1.570	917	1.525	97
2.608	1.013	2.569	99

ción de predenitrificación asociada al reactor PINBT. Puede utilizarse un tanque de postdenitrificación si se precisa descargar un efluente de calidad. El sistema piloto Biogreen ha sido probado con descarga de estiércol porcino utilizando el efluente después de la separación PAM, en un estudio realizado en el Centro de Residuos de Origen Animal

de la NCSU de Raileigh, NC (Becker, 2001; Vanotti et al., 2001).

La supresión del nitrógeno presenta unas eficacias del 93% para el nitrógeno total y del 99% para el amoníaco (tabla III). La nitrificación produce acidez y consume alcalinidad, pero normalmente no se precisa ningún suplemento cuando se utiliza

TABLA IV Calidad del caudal de entrada y efluente depurado en la planta piloto de Raileigh, NC. Flujo continuo con un tiempo de retención de 13 horas para el tanque de nitrificación y de 31 horas para el tanque de denitrificación. El tanque de nitrificación contenía un 18% de pellets de PEG.

	Calidad del caudal de entrada	Efluente depurado
pH	7,7	7,9
Alcalinidad, mg/l	1.378	653
Sólidos en suspensión, mg/l	135	110
DQO, mg/l	1.527	220
NH ₄ -N, mg/l	231	1
NO ₃ -N, mg/l	0	5
Kjeldahl-N, mg/l	259	19

*Evaluación en la planta piloto de Raileigh, NC. Flujo continuo con un tiempo de retención de 13 horas para el tanque de nitrificación y de 31 horas para el tanque de denitrificación. El tanque de nitrificación contenía un 18% de pellets de PEG.

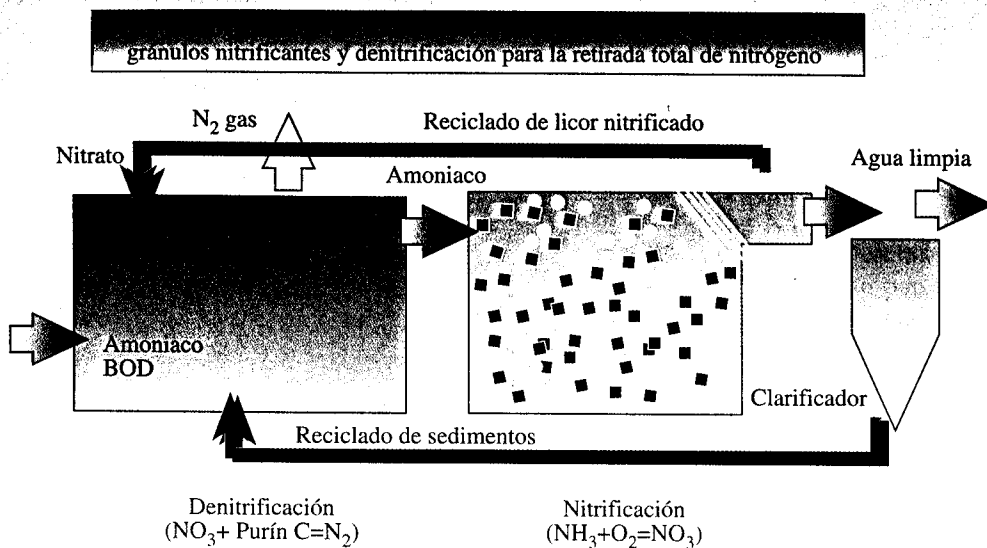


Fig. 10.— Sistema Biogreen de tratamiento de nitrógeno.

una configuración de predenitrificación.

Una consideración importante de cara a la denitrificación es la ratio entre DQO

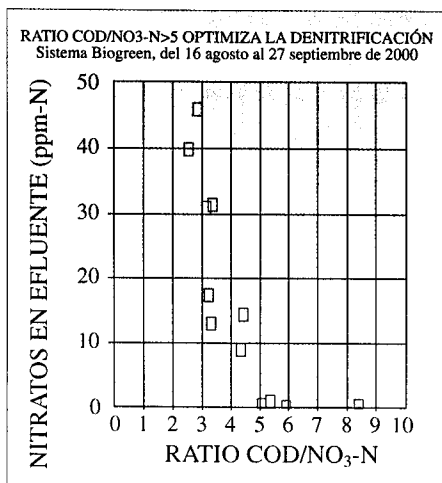


Fig. 11.— Carbono soluble que no se separa con PAM es necesario para una denitrificación completa.

y los nitratos aplicados al reactor anóxico. Las ratios bajas constituyen un problema. La eficacia de la denitrificación biológica aumenta cuando la ratio DQO/N oxidado aumenta a un valor óptimo de 5 a 7, por encima del cual las prestaciones ya permanecen constantes (fig. 11).

El ratio habitual DQO/N oxidado después de la separación PAM es de 6 a 11, por lo que una escasez de carbono no es importante. Otro aspecto relevante del proceso de desnitrificación aplicado al purín de origen porcino es el riesgo de producción de óxido nitroso, un gas de invernadero, en lugar de gas N₂. Bernet y sus colaboradores (1996) han estudiado el problema, y sus resultados muestran que cuando la ratio carbono orgánico/nitrato se situaba entre 1,6 y 2,4, el nitrato quedaba totalmente reducido, pero había óxido nitroso en el gas generado. En cambio, cuando la ratio TOC/N nítrico era superior a 2,4, el nitrato quedaba completamente reducido a